

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК.621.774.39

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
_____ Кружаев В.В.
«__» _____ 2013

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы развития
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫСАДКИ КОНЦОВ ТРУБ
НА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕССАХ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ КАЧЕСТВА»

(Заключительный)

Зав.кафедрой

(подпись, дата)

А.А.Богатов

Научный руководитель

(подпись, дата)

А.А.Богатов

Исполнитель

(подпись, дата)

М.В.Ерпалов

Екатеринбург 2013

Реферат

1. ФИО автора (ов):

Ерпалов Михаил Викторович

Erpalov Mikhail Viktorovich

2. Аннотация:

Работа посвящена процессу высадки концов насосно-компрессорных труб на гидравлических прессах SMS Meer. Рассмотрены вопросы оптимизации технологии высадки с целью повышения качества продукции, а также для снижения затрат на производство. Проведен анализ формоизменения металла в очаге деформации, анализ температурных условий процесса, найдены зависимости для расчета усилия прессования, а также определены пути повышения технико-экономических показателей производства. В результате удалось оптимизировать процесс высадки концов насосно-компрессорных труб и обеспечить выход годной продукции на уровне 99,8%.

This work is devoted to the process of pipe ends upsetting in hydraulic presses SMS Meer. The issues of upsetting technology optimization to improve the quality of products and to reduce manufacturing costs are considered. The analyses of metal forming in the deformation zone and thermal conditions of the process were carried out, the equation to calculate the press forces was obtained and the ways to improve the economic indicators of the process were identified. As a result, it was able to optimize the pipe ends upsetting process and ensure the production yield at the level of 99.8%.

3. Ключевые слова:

Насосно-компрессорные трубы, высадка концов труб, качество, формоизменение металла, нагрев, усилие деформации, инструмент, стойкость, смазка.

Tubing, upsetting of pipe ends, quality, metal forming, heating, deformation force, deformation tools, tool life, lubrication.

4. Тема отчета:

Исследование технологического процесса высадки концов труб на гидравлических прессах с целью повышения их качества

The research of pipe ends upsetting in hydraulic presses in order to improve the quality of tubing.

Содержание

Введение	4
1. Технология высадки концов насосно-компрессорных труб на гидравлических прессах SMS Meer	5
2. Особенности формоизменения металла при высадке концов труб	8
3. Оптимизация режимов нагрева концов труб перед высадкой	13
3.1. Методика исследования	13
3.2. Определение степени черноты марки стали 30Г2	14
3.3. Анализ температурных полей металла при нагреве концов труб	16
4. Определение энергосиловых параметров процесса высадки	20
5. Пути повышения технико-экономических показателей производства	24
5.1. Повышение стойкости инструмента	24
5.2. Повышение качества смазочного материала	26
Заключение	29
Список использованных источников	30

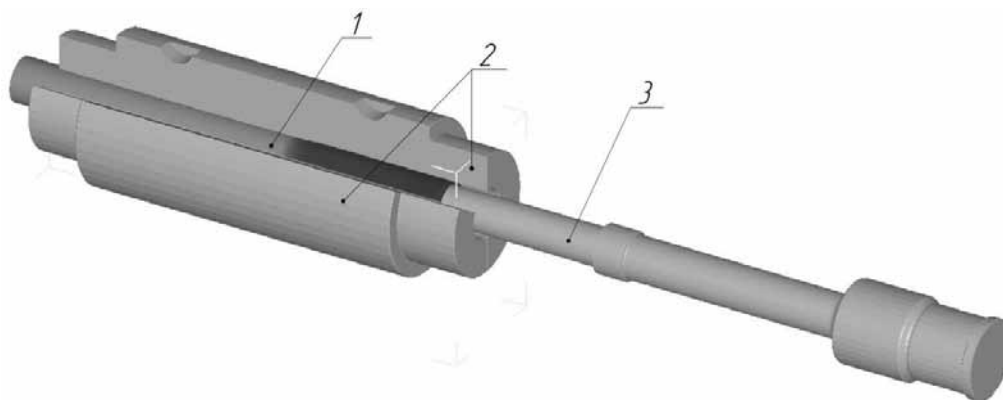
Введение

В настоящее время наблюдается ужесточение требований нефтедобывающих компаний к качеству насосно-компрессорных труб, в частности, повышение коррозионных и прочностных характеристик, необходимость обеспечения равной прочности резьбового соединения и тела труб, используемых на промысловых колоннах глубиной более 1500 м. Эти возрастающие требования определяют актуальность научно-практических работ по модернизации технологии производства горячекатаных труб, в том числе с высаженными концами.

В представленной работе предложены пути совершенствования технологического процесса высадки концов труб на гидравлических прессах. Исследование формоизменения концов труб и силовых параметров процесса имеет научную новизну, а оптимизация режимов нагрева труб перед высадкой, меры по повышению стойкости инструмента и качества смазки, а также снижение себестоимости с одновременным повышением выхода годной продукции с первого предъявления – практическую значимость.

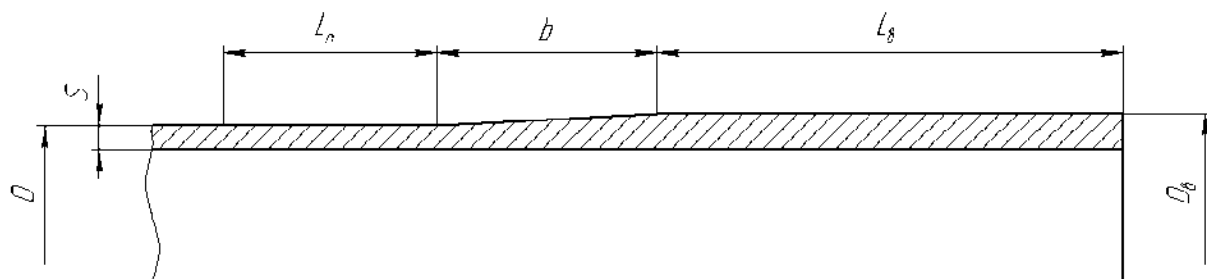
1. Технология высадки концов насосно-компрессорных труб на гидравлических прессах SMS Meer

В зависимости от размеров и вида утолщений концов труб операцию высадки производят в один, два или более переходов с применением одного или двух нагревов конца трубы на гидравлических прессах или горизонтально-ковочных машинах путем осаживания конца трубы пуансоном в закрытую полость разъемных матриц (рис. 1) [1]. Различают наружную высадку концов труб, внутреннюю, а также комбинированную. Насосно-компрессорные трубы, изготавливаемые по наиболее распространенным стандартам ГОСТ 633-80, ГОСТ Р 53366-2009, API 5CT, имеют наружную высадку, основными геометрическими параметрами формы которой являются длина цилиндрической части высаженного конца $L_{\text{в}}$, длина конического пояса b и длина переходной зоны за коническим пояском $L_{\text{п}}$, на которой допускается превышение предельного плюсового отклонения наружного диаметра трубы до 1 мм по ГОСТ 633-80 и до 2,38 мм (для труб диаметром до 88,9 мм включительно) или 2,78 мм (для труб диаметром более 88,9 мм) по ГОСТ Р 53366-2009 и API 5CT (рис. 2). Числовые значения размеров высаженной части труб с допусками приведены в соответствующих стандартах.



1 – труба с нагретым концом; 2 – комплект матриц; 3 – пуансон

Рис. 1 – Схема высадки концов труб на гидравлическом прессе

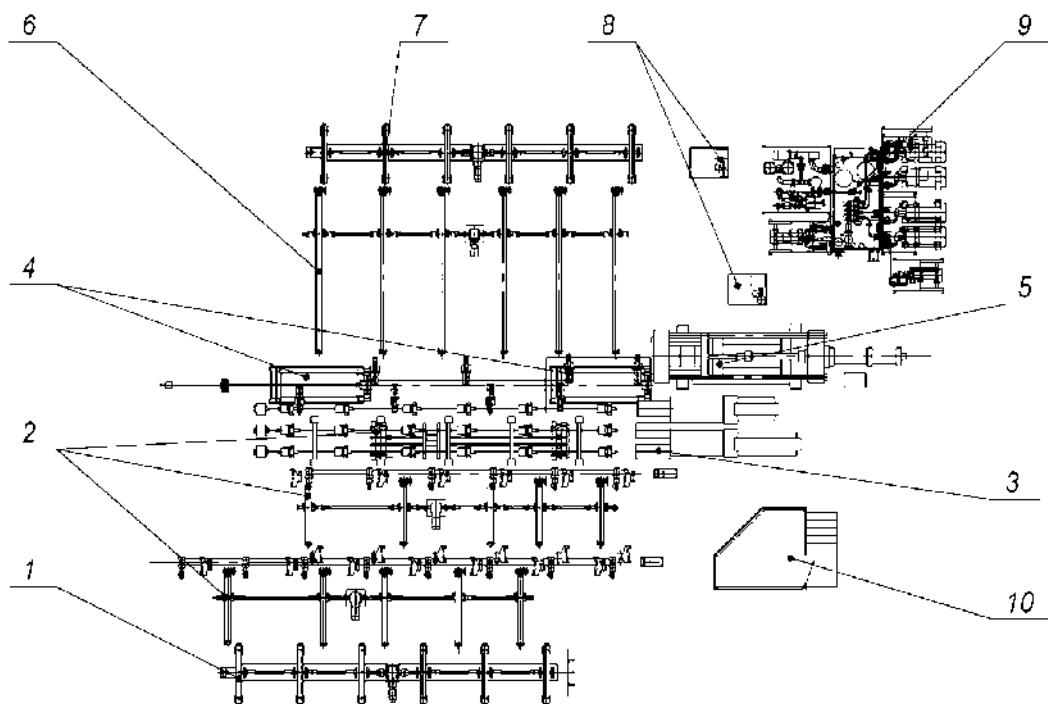


$D \times S$ – исходные размеры заготовки; $D_{\text{в}}$ – диаметр высаженной части;
 $L_{\text{в}}$ – длина цилиндрической части высадки; b – длина конического пояса;
 $L_{\text{п}}$ – длина переходной зоны

Рис. 2 – Схема высаженного конца трубы

В настоящее время высадку концов труб производят в основном на гидравлических прессах фирмы SMS Meer [2]. На рис. 3 представлена типичная схема расположения оборудования участка высадки труб, а в табл. 1 приведена краткая техническая характеристика пресса.

Технологический процесс производства НКТ с высаженными наружу концами заключается в следующем. Трубы из загрузочного устройства поштучно передаются на нагрев концов в трех последовательно расположенных индукторах. В зависимости от заданной длины нагрева индукторы автоматически позиционируются относительно нагреваемого конца трубы. В первом и втором индукторах производится предварительный нагрев до температуры 850°C. Температура нагретых концов на выходе из третьего индуктора находится в диапазоне 1240-1280°C. Для предотвращения перегрева торца трубы предусмотрено короткозамкнутое кольцо. После отвода третьего индуктора, труба клещевым манипулятором задается в пресс, где фиксируется специальными зажимными кулачками, при этом время с момента окончания нагрева до начала рабочего хода пуансона составляет 12 с. За это время температура конца трубы уменьшается в среднем на 40-80°C. Каретка пуансонодержателя совершает ускоренный холостой, а затем рабочий ход и при достижении заданного значения усилия деформации осуществляется формоизменение конца трубы за 1,7-2,5 с. Температура высаженного конца трубы после извлечения пуансона и разведения матриц составляет 670-820°C.



1 – загрузочный карман; 2 – входная сторона пресса; 3 – индукторы; 4 – клещевой манипулятор;
5 – гидропресс; 6 – выходная сторона пресса; 7 – карман для высаженных труб;
8 – баки для приготовления смазки; 9 – маслостанция; 10 – пульт управления

Рис. 3 – Схема расположения оборудования участка высадки НКТ

Краткая техническая характеристика пресса высадки

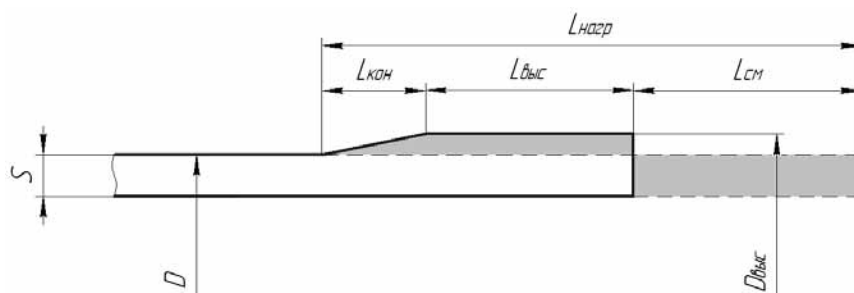
Наименование параметра	Технические данные
Максимальное усилие высадки вперед	около 2500 кН
Максимальное усилие высадки назад	около 1250 кН
Ход высадочного цилиндра	1700 мм
Макс. давление зажимного устройства	280 бар
Радиальный ход зажимного устройства	37 мм
Минимальный диаметр высадки	42,2 мм
Максимальный диаметр высадки	146,1 мм
Максимальная скорость передвижения высадочного цилиндра (высадки) -вперед -назад -на полную силу	максимум 500 мм/с максимум 500 мм/с максимум 95 мм/с
Максимальное рабочее давление	280 бар
Характеристики труб, подлежащих высадке	
Диаметр высаживаемых труб	60,3-127,0мм
Толщина стенки	4,8-12,7 мм
Длина труб	7,0-12,0м

Основными технологическими параметрами процесса нагрева и высадки концов труб на гидравлических прессах являются:

1. температура нагрева;
2. длина нагрева;
3. расстояние от торца трубы до короткозамкнутого кольца в третьем индукторе;
4. расстояние от торца трубы до торца матрицы;
5. давление высадки;
6. время выдержки под давлением;
7. время охлаждения инструмента;
8. концентрация и количество нанесенной смазки (пропорция смешивания).

Температура нагрева концов труб определяет сопротивление деформации и зависит от химического состава конкретной стали. При неудовлетворительном качестве высаженных концов, как правило, увеличивают температуру нагрева металла, однако для улучшения структуры стали и экономии электроэнергии рекомендуется уменьшать температуру нагрева концов труб.

Длина нагрева концов труб является важным технологическим параметром, т.к. определяет тот объем металла, который подлежит деформации (выделено серым цветом на рис. 4). Из рис. 4 видно, что длина нагреваемого участка трубы должна быть таковой, чтобы переход от горячего металла к холодному совпадал с переходом от конического пояса матрицы к нерабочему участку. Неправильный выбор длины нагрева $L_{\text{нагр}}$ может приводить либо к непроработкам профиля высаженного конца трубы, либо к переполнению калибра и образованию торцевого облоя.



D и S – диаметр и толщина стенки исходной трубы; $D_{\text{выс}}$ – диаметр высаженной части трубы;
 $L_{\text{кон}}$ и $L_{\text{выс}}$ – длина конического и цилиндрического участков посадки;
 $L_{\text{см}}$ – длина смещенного участка трубы; $L_{\text{нагр}}$ – длина нагрева

Рис. 4 – К определению длины нагрева конца трубы

Расстояние от торца трубы до передней кромки матрицы определяет длину высаживаемой части трубы. С увеличением этого расстояния смещаемый объем металла уменьшается, что приводит в результате к меньшему значению длины высаженной части трубы.

Давление жидкости в главном гидроцилиндре определяет усилие прессования, при недостаточном значении которого происходит непроработка профиля высаженной части трубы и образование дефектов в виде раковин на наружной или внутренней поверхности трубы. Для устранения этих несоответствий производят увеличение давления.

Время охлаждения и количество нанесенной смазки определяет температуру и стойкость технологического инструмента – пуансона и матриц. Износ инструмента, а также плохие условия трения на контактных поверхностях с металлом трубы, могут приводить к дефектам на наружной или внутренней поверхности трубы.

Таким образом, одним из важнейших условий обеспечения высокого качества труб с высаженными концами является выбор оптимальных значений технологических параметров процесса нагрева и посадки концов труб.

2. Особенности формоизменения металла при посадке концов труб

Понимание особенностей формоизменения металла при посадке концов насосно-компрессорных труб позволяет оперативно управлять технологическими параметрами рассматриваемого процесса с целью обеспечения стабильно высокого уровня качества продукции. Вопросу анализа формоизменения металла при утолщениях концов труб на различном оборудовании, в т.ч. на гидравлических прессах, посвящены работы [3-6].

В представленной работе анализ формоизменения металла проведен с помощью метода конечных элементов, реализованного в программе Deform-3D¹.

¹ Лицензия кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Модель прессы высадки (рис. 1) для каждого из 4 выбранных типоразмеров труб, а именно 60,3x5,0 мм, 73x5,5 мм по ГОСТ 633-80 и 60,32x4,83 мм, 73,02x5,51 мм по API 5CT, была построена с учетом существующих на производстве калибровок матриц и пуансонов (ОАО «ПНТЗ»). Материал трубы AISI-1045 выбран из базы материалов программы Deform-3D, среда – вязкопластическая. Характерный размер элемента в очаге деформации был принят равным от 1 до 3 мм, что соответствует 200 000-250 000 конечных элементов на заготовке длиной 700 мм. С целью упрощения постановки задачи было сделано допущение, что пуансон перемещается с постоянной скоростью, равной 100 мм/с. Взаимодействие заготовки с инструментом было описано законом трения по Зибелю:

$$\tau = \psi \cdot \tau_s,$$

где τ – напряжение трения, МПа;

ψ – показатель трения, равный 0,3;

τ_s – сопротивление деформации материала на сдвиг, МПа.

Граничные условия для температурной задачи были сформулированы как граничные условия третьего рода:

$$q = \alpha \cdot \Delta\theta,$$

где q – плотность теплового потока на граничной поверхности, Вт/м²;

α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К);

$\Delta\theta$ – разность температур, °С.

Температура инструмента принята постоянной и равной для пуансона 130°С, для матриц – 190°С. Для моделирования процесса последовательного нагрева концов труб в трех индукторах в силу невозможности выяснить точные характеристики каждого из них были применены граничные условия в виде теплового потока, значения которого подбирались для каждого конкретного случая для удовлетворения условиям реального процесса по температуре нагрева, при этом учитывалось время транспортирования от одного индуктора к другому, равное 12 с.

В результате решения задач математического моделирования определен характер формоизменения конца заготовки, а также найдены значения величин, характеризующих напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации в каждый момент времени.

Характер формоизменения металла в процессе деформации можно описать следующим образом. После соприкосновения пуансона с трубой наступает стадия раздачи конца трубы за счет увеличения диаметра трубы в сечении торца. Длительность этого

процесса занимает 50-60% всего времени деформирования, при этом интенсивность степени касательных напряжений не превышает значений 20-22 МПа, а усилие прессования находится на уровне 15 кН для труб условного диаметра 60 мм и 20 кН – диаметра 73 мм.

Далее наступает стадия потери устойчивости продольного и поперечного профиля трубы. Профиль деформируемого конца трубы приобретает синусоидальную форму за счет разнонаправленности скоростей частиц металла в разных областях по длине трубы, а контакт с пуансоном постепенно переходит полностью в контакт с матрицами. Это видно из рис. 5, на котором представлены линии уровня для вертикальной составляющей (в плоскости рисунка) скорости перемещения частиц металла. Длительность этой стадии составляет 20-25% от всего времени деформирования. За это время усилие прессования плавно увеличивается до значений 150-160 кН для труб условного диаметра 60 мм и 200-210 кН – диаметра 73 мм.

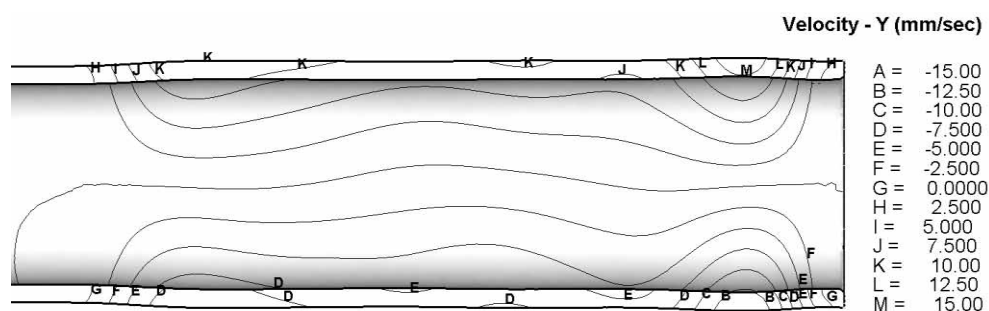


Рис. 5 – Стадия потери устойчивости

Следующей стадией прессования является локальное заполнение очага деформации между пуансоном и матрицами, начиная от поршневой части пуансона. Таким образом, имеет место локализация деформации в малом объеме металла вблизи зоны контакта с пуансоном (рис. 6), что важно для анализа причин образования внутренних незаполнений. Зона локализации деформации без видимых изменений в размерах перемещается от торца трубы в сторону конического пояса матрицы.

На рис. 6,а представлено распределение осевой составляющей скорости перемещения частиц металла. Видно, что область металла, прилегающая к торцу трубы, перемещается в осевом направлении с одинаковой скоростью, равной скорости перемещения пуансона. Левее этой области происходит уменьшение скорости (по модулю) вплоть до нуля. Рис. 6,б показывает распределение радиальной составляющей скорости перемещения частиц металла. Темная область рисунка представляет собой зону локализации деформации, в которой частицы металла перемещаются в радиальном направлении от матриц к пуансону, после достижения контакта с которым, зона локализации перемещается левее.

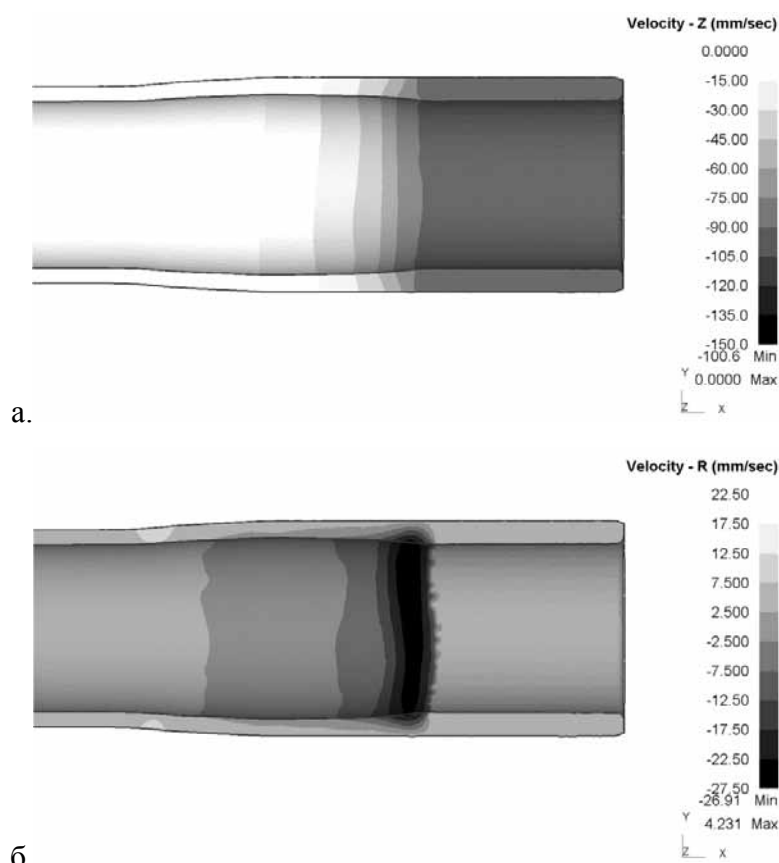


Рис. 6 – Стадия заполнения очага деформации

В последнюю очередь происходит формирование конического пояска высаженного конца трубы. На рис. 7 представлены поля осевой и радиальной составляющей скоростей перемещения частиц металла. При анализе полей скоростей, полученных в результате конечно-элементного моделирования (рис. 7) можно сделать вывод о том, что часть металла 1 формирует конический поясок высадки подобно заполнению очага деформации по всей длине высадки на предыдущей стадии процесса. Однако под действием области 1 область металла 2, формируя переходную часть высадки за коническим пояском, течет в противоположном радиальном направлении. Переходная зона служит для плавного перехода от высаженной к гладкой части трубы, при этом допуск, на наружный диаметр в этой зоне превышает допуск на диаметр исходной трубы.

Следует отметить, что при окончательном формировании конического пояска трубы наблюдается конкурирующий процесс – образование торцевого облоя. Причиной этого является то, что достигаемое усилие прессования становится достаточным не только для полной проработки торца трубы 3, но и для начала формирования облоя. Усилие прессования в конечной стадии заполнения очага деформации достигает значений 320-330 кН для труб условного диаметра 60 мм и 420-450 кН – диаметра 73 мм. График изменения усилия прессования трубы размером 73,02x5,51 мм представлен на рис. 8.

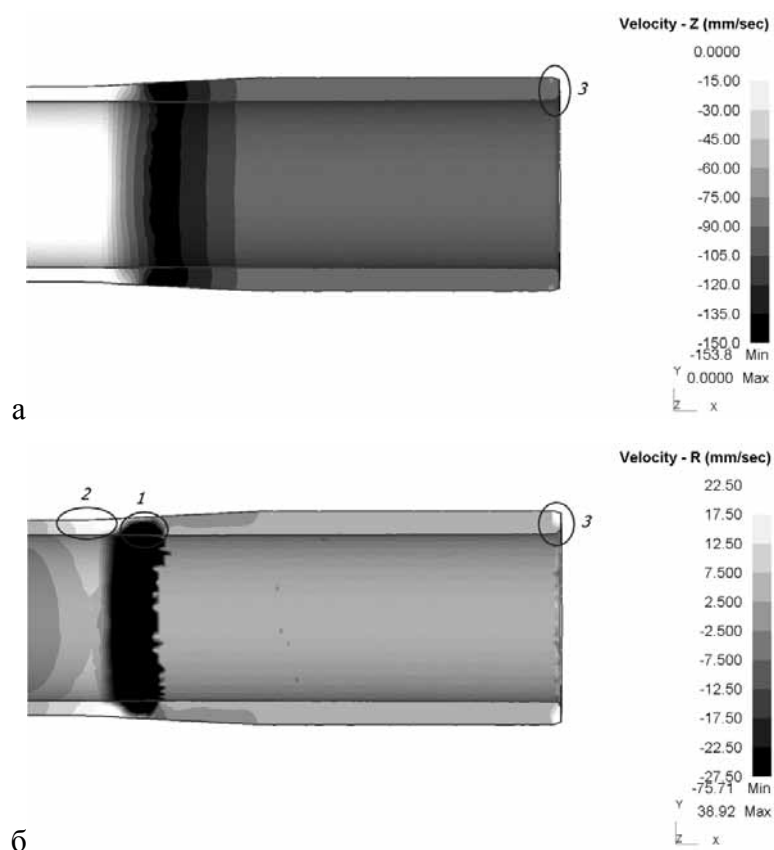


Рис. 7 – Окончательная стадия заполнения очага деформации

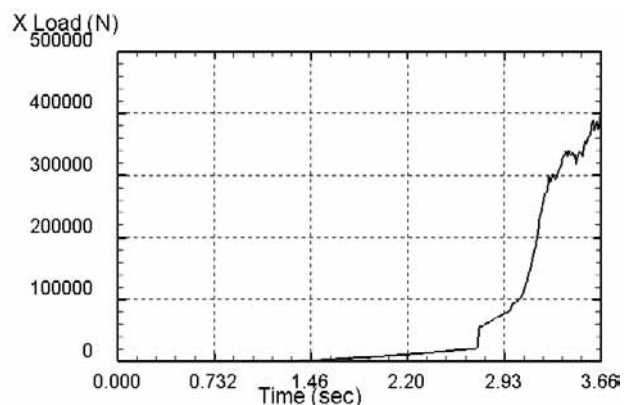


Рис. 8 – Усилие прессования для трубы размером 73,02x5,51 мм по API 5CT

Таким образом, изучены особенности формоизменения металла в процессе наружной высадки концов насосно-компрессорных труб. Показано, что наиболее вероятное незаполнение калибра возможно на внутренней поверхности трубы в зоне конического пояса высадки. Следует отметить, что именно это несоответствие является наиболее часто встречающимся при производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на реальном оборудовании.

Установлено, что для повышения надежности технологии производства труб и повышения их качества необходимо увеличивать длину нагрева конца трубы с одновременным незначительным охлаждением торца трубы за счет изменения позиции короткозамкнутого кольца при нагреве в третьем индукторе.

3. Оптимизация режимов нагрева концов труб перед высадкой

Одними из важнейших технологических параметров высадки концов труб на гидравлических прессах являются длина и температура нагрева конца трубы. В процессе нагрева концов труб происходит перераспределение тепла от горячих участков трубы к холодным. В результате этого эффективная длина и температура нагрева отличаются от заданных режимов, что необходимо учитывать для обеспечения высокого уровня качества продукции.

3.1. Методика исследования

Исследование процесса нагрева концов труб перед высадкой проведено в условиях производства на гидравлическом прессе фирмы SMS Meer на ОАО «ПНТЗ».

Нагрев труб для высадки осуществляется в трех последовательно расположенных индукторах. В зависимости от заданной длины нагрева индукторы автоматически позиционируются относительно нагреваемого конца трубы. Для контроля температуры нагрева металла и автоматической корректировки мощности предусмотрены четыре стационарных пирометра. По два пирометра контролируют температуру на выходе из второго и третьего индукторов.

Выбор методики и оборудования для проведения исследования осуществлялся исходя из необходимости определения температурных полей в металле заготовки по всей длине нагреваемого участка трубы. Исходя из этого использование стационарных пирометров в исследовательских целях невозможно, т.к. они измеряют максимальную температуру по всей длине нагретого конца трубы. Использование переносных пирометров также затруднительно, т.к. они не позволяют определять температуру во множестве точек одновременно.

Для проведения исследований был использован тепловизор ThermoCAM P640 производства фирмы FLIR Systems AB, предоставленный управлением главного энергетика ОАО «ПНТЗ». Однако сложность применения тепловизора при определении температурных полей в металле вызвана тем, что при больших перепадах температур (до 1200°C и более) для разных точек получаемых термограмм необходимо устанавливать собственное значение коэффициента излучения, которая в значительной степени зависит от температуры.

Для определения степени черноты марки стали 30Г2 была использована хромель-алюминиевая термопара (ХА), горячий спай которой был установлен в специально подготовленное отверстие в трубе 73,02x5,51 мм на расстоянии 105 мм от торца и был зачеканен для обеспечения надежного контакта с металлом трубы в процессе нагрева.

3.2. Определение степени черноты марки стали 30Г2

В процессе последовательного нагрева одной трубы в трех индукторах были зафиксированы значения показаний термопары. Одновременно с этим производилась регистрация распределения температуры металла по длине заготовки с помощью тепловизора. Для получения большего количества измерений показания термопары регистрировались в процессе охлаждения сразу после нагрева до заданной температуры в третьем индукторе. Результаты замеров приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты замеров температуры нагрева конца трубы

Место замера	Время замера	Данные с тепловизора		Показания термопары, °C	Показания пирометров, °C
		Средняя температура в точке контакта с термопарой, °C	Степень черноты материала ε		
перед нагревом	12:45:20	29	1	25	—
после 1 индуктора	12:48:40	646,0	0,964	646	—
после 2 индуктора	12:49:08	938,4	0,833	938	1045
после 3 индуктора	12:49:32	1378,5	0,610	1377	997 (на входе) 1397 (на выходе)
остывание 18 с	12:49:50	1214,8	0,670	1215	—
остывание 32 с	12:50:04	1126,9	0,741	1126	—



Рис. 9 – Конец трубы после нагрева в 3-м индукторе

Обработка результатов измерений, полученных с помощью тепловизора, производилась в программе FLIR ResearchIR². В качестве примера на рис. 9 представлена термограмма нагретого конца трубы на выходе из третьего индуктора. На термограмме *El1 (Ellipse)* означает пятно визирования, в точках которого за счет коррекции степени черноты средняя температура установлена на уровне показаний термопары. В результате была определена степень черноты материала в зависимости от температуры. Соответствующие данные приведены в табл. 2. Высокая температура нагрева в третьем индукторе вызвана тем, что труба нагревалась не в потоке, при этом система автоматики не имела возможности адаптироваться к изменившимся условиям нагрева (дополнительно установлена термопара). При таких температурах происходят необратимые процессы в структуре металла, тем не менее, данные по нагреву были получены и обработаны.

Для определения степени черноты материала в холодном состоянии тепловизор был переведен в диапазон измерений 0...500°C. При этом температура трубы 25°C была определена на термограмме при степени черноты, равной 1. Это обусловлено влиянием отраженного тепла, а также тем фактом, что засверленное отверстие в трубе представляет собой модель, похожую на модель абсолютно черного тела.

Результаты определения зависимости коэффициента излучения от температуры были аппроксимированы ломаной линией, состоящей из двух участков (рис. 10). Уравнение зависимости было получено в следующем виде:

$$\varepsilon = \begin{cases} 1,00145 - 0,000057971 \cdot T, \text{ при } T \leq 657,2^\circ\text{C}; \\ 1,28892 - 0,000495395 \cdot T, \text{ при } T > 657,2^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (1)$$

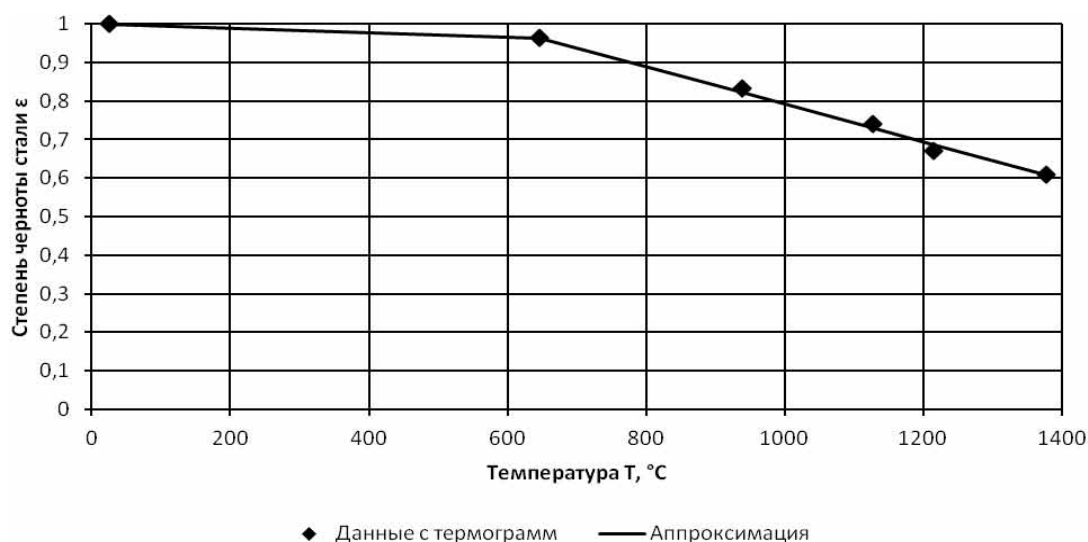


Рис. 10 – График зависимости степени черноты стали 30Г2 от температуры

² Лицензия кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Из табл. 1 видно, что показания стационарных пирометров превышают показания термопары, при этом разница в значениях температуры для второго индуктора 107°C значительно выше, чем для третьего индуктора 20°C. Это можно объяснить тем, что стационарные пирометры настроены на одинаковую степень черноты без учета влияния температуры, что приводит к завышению показаний во втором индукторе.

3.3. Анализ температурных полей металла при нагреве концов труб

Для исследования температурных полей в металле заготовки нагреву были подвергнуты шесть труб из марки стали 30Г2. Фиксация температур производилась с помощью тепловизора и стационарных пирометров. Нагрев труб осуществлялся по следующим режимам. Длина нагрева конца трубы установлена равной 310 мм, температура – 1290°C. Расстояние до короткозамкнутого кольца составило 70 мм, а время цикла нагрева в одном индукторе – 25 с.

На первом этапе изучения процесса индукционного нагрева концов труб был проведен сравнительный анализ результатов, полученных с помощью пирометров и тепловизора. Для корректного сравнения данных степень черноты на термограммах установлена без учета зависимости от температуры. Для каждого конца трубы определена максимальная температура нагрева металла. Сравнение данных для второго и третьего индукторов, полученных с применением разных приборов, приведено на рис. 11 и 12 соответственно.

Небольшие различия (до 10%) в значениях максимальных температур нагрева можно объяснить разницей по толщине стенки в вертикальном и горизонтальном сечениях труб (пирометры измеряют температуру в вертикальной плоскости трубы, а тепловизор – в горизонтальной). Различие по температуре в вертикальной и горизонтальной плоскостях наиболее характерно для трубы №1. На рис. 13 выделены точки с максимальной температурой.

Анализ температуры нагрева концов труб с помощью тепловизора дает хорошую сходимость с результатами замера с помощью стационарных пирометров, однако при условии, что степень черноты выбрана постоянной и не зависящей от температуры.

В реальных же условиях степень черноты вносит существенные изменения в получаемые результаты. Поэтому на втором этапе было проведено сравнение данных, полученных на основе термограмм с учетом и без учета влияния степени черноты. На рис. 14 приведены графики распределения температур по длине заготовки, полученные для трубы №2 после нагрева в каждом из трех индукторов.

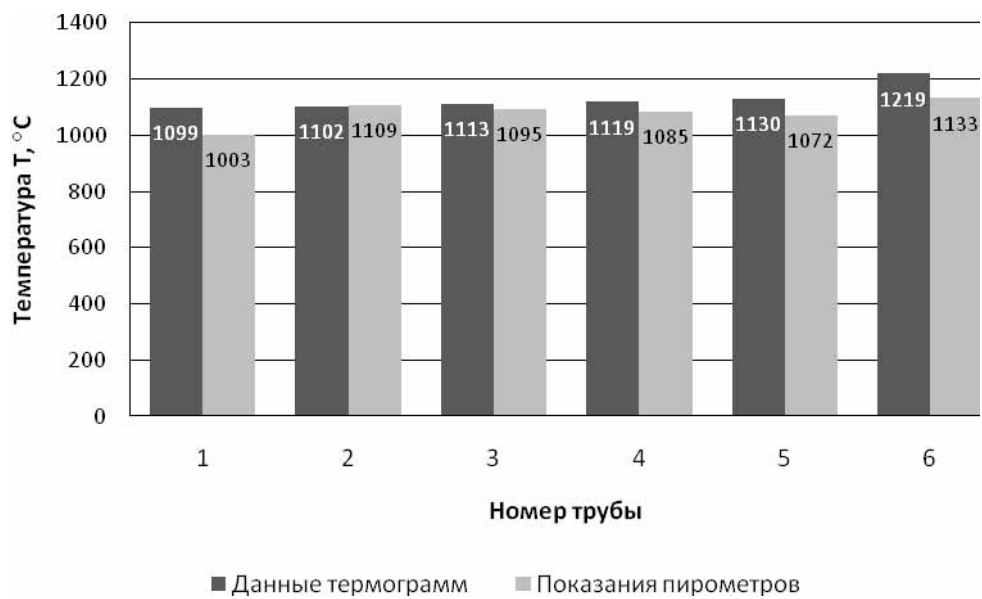


Рис. 11 – Данные по нагреву во втором индукторе

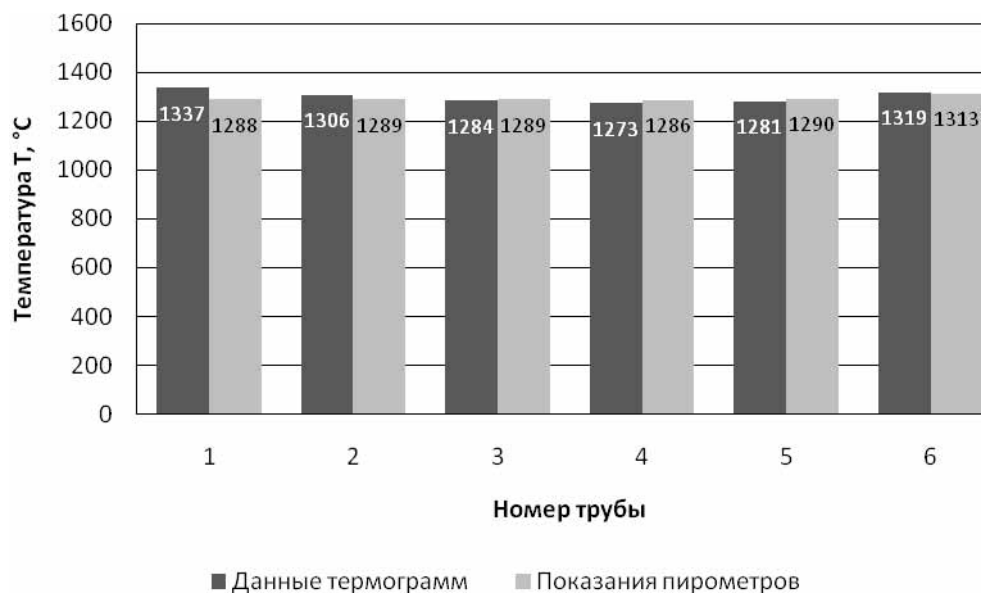


Рис. 12 – Данные по нагреву в третьем индукторе



слева – нагрев во втором индукторе; справа – нагрев в третьем индукторе

Рис. 13 – Участки трубы №1 с наибольшей температурой

Анализ результатов, представленных на рис. 14 позволяет сделать следующие выводы. Данные, полученные с учетом изменения степени черноты, свидетельствуют о более низкой температуре нагрева конца трубы, чем при определении температуры при постоянном коэффициенте излучения. При этом результаты замера температуры с помощью термопары хорошо согласуются с данными, полученными при переменной степени черноты.

Разница по температуре после третьего индуктора переменна по длине заготовки, т.е. анализ термограмм без учета степени черноты приводит к уменьшению градиента температур.

На третьем этапе был определен характер распределения температуры концов труб по длине нагрева с учетом полученного закона изменения коэффициента излучения (рис. 10). В связи с тем, что индуктора №1 и 2 работают в паре от одного преобразователя, то температура первой и последней труб могут в значительной степени отличаться от установленного значения. Для исключения этого влияния на получаемые результаты трубы с номерами 1 и 6 были исключены из рассмотрения.

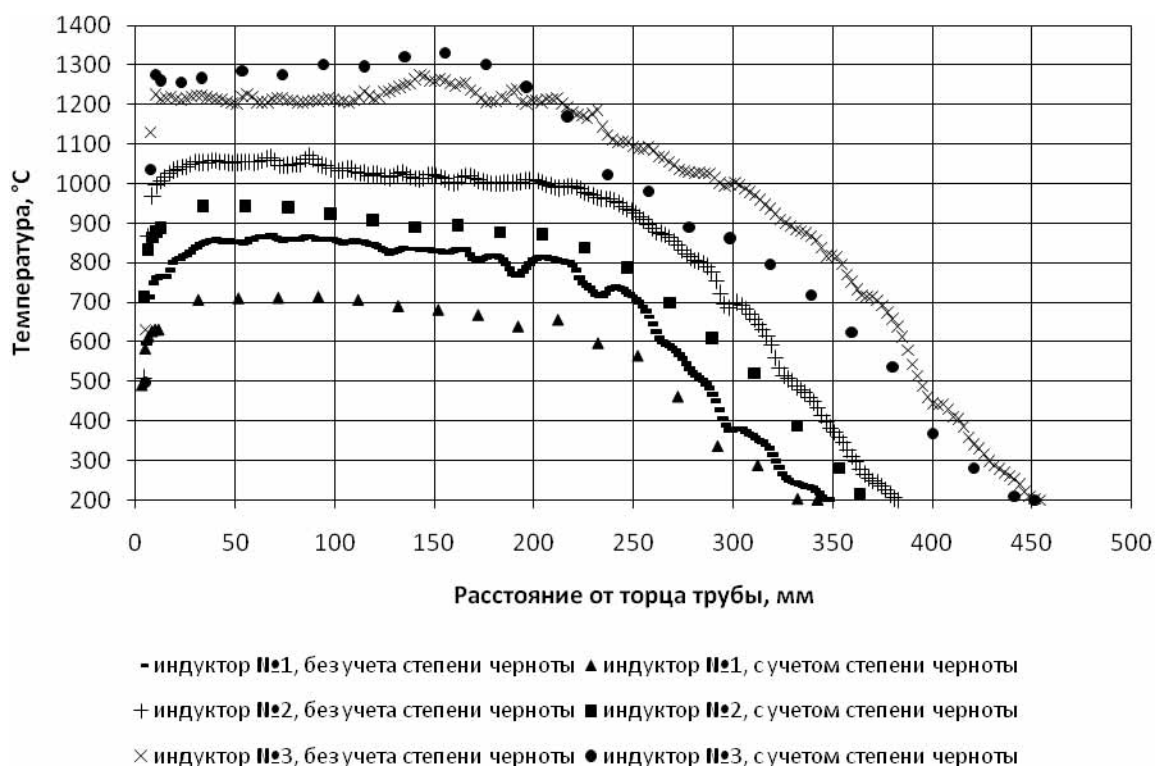


Рис. 14 – Влияние учета зависимости степени черноты от температуры

На рис. 15 приведено распределение температур по длине нагретых концов труб №№2-5. Температуры определялись по термограммам по оси заготовки (в горизонтальной плоскости) с шагом приблизительно 20 мм начиная от торца каждой трубы. Распределение температур вблизи торца трубы определены с шагом 2-3 мм.

Анализ данных, представленных на рис. 15 позволяет утверждать, что повторяемость температурных полей от трубы к трубе уменьшается при переходе от одного индуктора к другому. Разница температур в одних и тех же сечениях рассмотренных труб находится на уровне 30°C для индуктора №1, 60°C – для индуктора №2 и 100°C – для индуктора №3. Средняя температура нагрева концов труб на выходе из 3-го индуктора составляет 1265°C, что на 25°C ниже установленной.

Длина нагрева до целевой температуры не соответствует заданному значению 310 мм. Это происходит из-за теплопроводности от горячего участка трубы к холодному. Длина участка с переходными значениями температур оставляет не менее 100 мм после нагрева в первом и втором индукторах, и не менее 200-250 мм – в третьем индукторе.

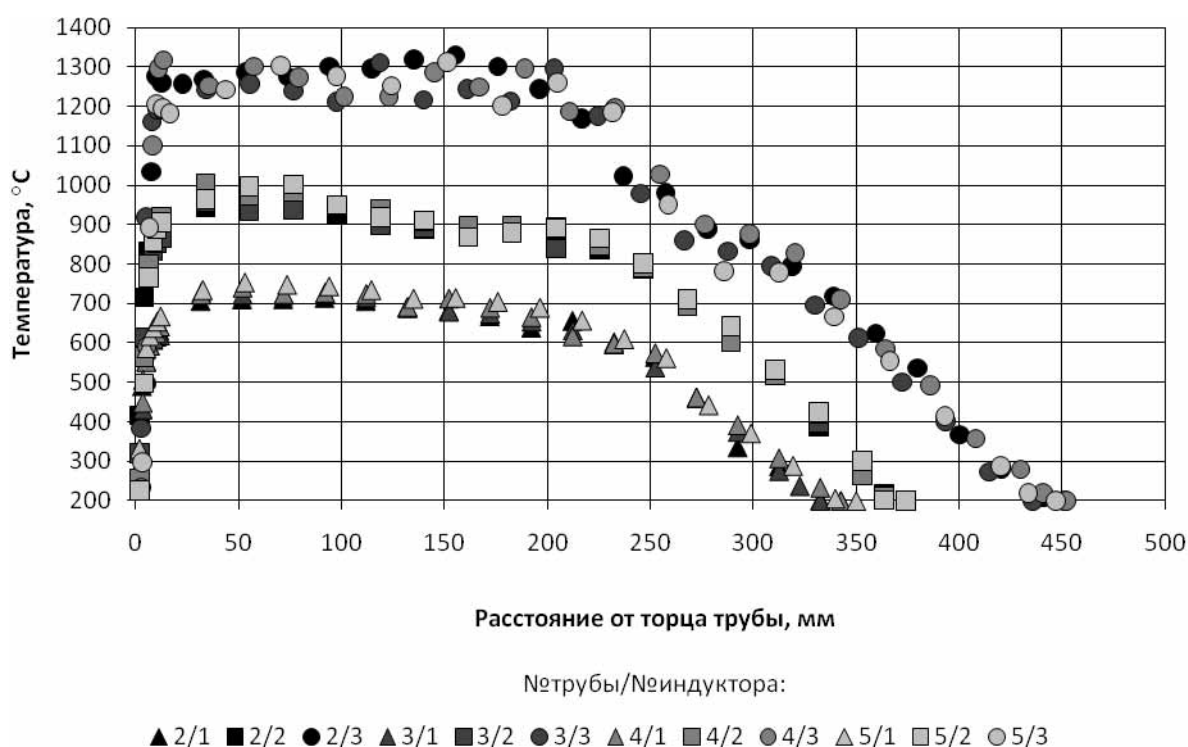


Рис. 15 – Распределение температур по длине заготовок

Уменьшение длины нагретого участка до заданной температуры на величину до 60÷80 мм необходимо учитывать при назначении режимов нагрева и прессования. Оптимальным считается совпадение начала переходного температурного участка трубы (начало падения температуры) с переходным участком матриц. Пример совпадения указанных участков трубы и инструмента продемонстрировано на рис. 4. На основании этого устанавливаемое значение длины нагреваемого конца заготовки должно определяться по формуле:

$$L_{\text{нагр.}} = L_{\text{кон.}} + L_{\text{выс.}} + L_{\text{см}} + 60 \div 80, \quad (2)$$

где 60÷80 мм – поправка на потери тепла в результате теплопроводности.

Таким образом, в работе установлена зависимость степени черноты марки стали 30Г2 от температуры и доказано соответствие получаемых данных и измерений с помощью термопары. Рекомендовано изменение настроек пирометров второго индуктора в сторону увеличения коэффициента излучения до 0,93 с целью отображения действительной температуры нагрева конца трубы во втором индукторе.

Установлено, что показания пирометров третьего индуктора от действительных значений температур отличаются незначительно. Однако длина нагрева отличается от установленного значения существенно. За счет теплопроводности металла трубы от горячих участков к холодным эффективная длина нагрева уменьшаются на величину до 60÷80 мм. Зависимость (2) позволяет определить величину нагрева конца трубы с учетом потерь тепла за счет теплопроводности.

Результаты исследовательской работы имеют важное практическое значение, т.к. позволяют с минимальными временными затратами и потерями металла устанавливать оптимальные значения режимов нагрева и прессования.

4. Определение энергосиловых параметров процесса высадки

Определение необходимого усилия деформации является важным этапом при назначении режимов нагрева и прессования. Повышение давления в главном гидроцилиндре пресса позволяет улучшить проработку очага деформации и обеспечивает отсутствие дефектов в виде раковин и незаполнений как на наружной, так и на внутренней поверхности высадки. Однако слишком большие значения давлений приводят не только к более жестким условиям эксплуатации оборудования и повышенному износу инструмента, но и к образованию дефектов в виде торцевого облоя или к чрезмерному уменьшению внутреннего диаметра трубы за рабочим участком пуансона.

Вопросам определения энергосиловых параметров процесса высадки посвящены работы [7,8], а также ряд других работ, в т.ч. представленных на конференциях.

Среди аналитических методов определения необходимого усилия прессования можно выделить:

- инженерный метод;
- метод верхней оценки;
- метод конечных элементов.

Недостатком первого метода является занижение расчетных значений усилия прессования, а последнего – длительный срок компьютерных расчетов. В работе поставлена и решена задача определения энергосиловых параметров процесса методом верхней оценки, из названия которого ясно, что расчетные значения усилий прессования

больше действительных, что в свою очередь обеспечивает проработку внутренней поверхности трубы с минимально возможным облоем.

Общий подход к применению метода верхней оценки для идеально пластического материала заключается в построении кинематически возможных полей скоростей для обеспечения простого решения задачи. Для этого удобно разбить весь очаг деформации на ряд жестких блоков, скорости каждой частицы которых одинаковы, и ряд блоков пластической деформации. При этом вся мощность выделяемых сил концентрируется в блоках пластической деформации, на границах блоков и на контактной поверхности с инструментом. Далее составляется баланс мощностей, решение которого позволяет определить усилие деформации:

$$N_d = \sum (N_i + N_j + N_k), \quad (3)$$

где $N_d = P \cdot v_0$ – мощность всех сил, выделяемых в процессе деформации, здесь P – искомое усилие прессования;

N_i – мощности сил трения на контакте металла с инструментом;

N_j – мощности сил среза на границах блоков;

N_k – мощности внутренних сил, затрачиваемых на пластическую деформацию.

Упрощенная схема очага деформации для наружной высадки насосно-компрессорных труб представлена на рис. 16. Труба зажата в специальных кулачках для предотвращения продольного смещения в процессе деформации, матрицы неподвижны, а пуансон имеет скорость v_0 в осевом направлении. Благодаря перемещению пуансона происходит заполнение свободного пространства матриц до заданной формы высадки.

Труба имеет исходные размеры наружного радиуса R_0 , внутреннего радиуса – r_0 . Радиус высаженной части – R_1 , длина цилиндрической части – $L_ц$, длина конического пояса – b .

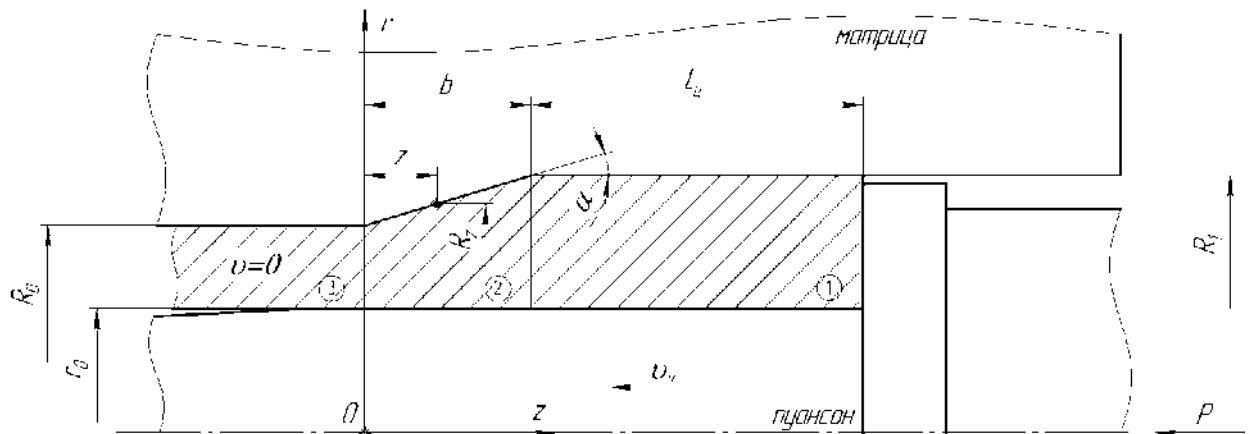


Рис. 16 – Схема очага деформации

Для решения конкретной задачи в работе сделан ряд допущений:

1. Материал трубы принят идеально пластическим, т.е. $T = \tau_s$, где T – интенсивность степени касательных напряжений, τ_s – сопротивление деформации на сдвиг;
2. Материал трубы несжимаемый;
3. Рассмотрена осесимметричная постановка задачи;
4. Рассмотрена конечная стадия деформации при полном заполнении калибра;
5. Для упрощения расчетов диаметр рабочей части пуансона принят постоянным и равным внутреннему диаметру трубы.

Очаг деформации разбит на три блока. Блок 1 жесткий и имеет постоянную скорость, равную скорости пуансона, блок 2 – зона пластической деформации, блок 3 жесткий и неподвижный.

С учетом имеющихся граничных условий и выбранного разбиения очага деформации на блоки кинематически возможные поля скоростей для каждого из них имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{- для блока 1 } & \begin{cases} v_r = 0; \\ v_z = -v_0; \end{cases} \\ \text{- для блока 2 } & \begin{cases} v_r = \frac{v_0}{2b} \left(r - \frac{r_0^2}{r} \right); \\ v_z = -\frac{v_0}{b} \cdot z. \end{cases} \\ \text{- для блока 3 } & \begin{cases} v_r = 0; \\ v_z = 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Кинематическое возможное поле скоростей для блока 2 находится исходя из предположения равномерного распределения деформации вдоль оси z , т.е. скорость деформации сдвига вдоль оси z постоянна:

$$\xi_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z} = \text{const}.$$

Для зоны пластической деформации 2 интенсивность степени деформации сдвига равна:

$$H_2 = \frac{v_0}{b} \sqrt{3 + \frac{r_0^4}{r^4}}.$$

Для выбранной схемы очага деформации в баланс мощностей входят следующие компоненты. Мощность сил трения на контакте металла с пуансоном в блоке 1:

$$N_1 = 0.$$

Мощность сил трения на контакте металла с пуансоном в блоке 2:

$$N_2 = \psi \pi \tau_s \nu_0 b r_0,$$

где ψ – показатель трения по Зиббелю;

Мощность сил трения на контакте металла с матрицами в блоке 1:

$$N_3 = 2\psi \pi \tau_s \nu_0 L_{\text{ц}} R_1.$$

Мощность сил трения на контакте металла с матрицами в блоке 2:

$$N_4 = \psi \pi \tau_s \frac{\nu_0}{b} \cdot k_1 \cdot k_2,$$

где
$$k_1 = \sqrt{\frac{(R_1 - R_0)^2 + b^2}{R_1^2(4b^2 - 2r_0^2) + r_0^4 + R_1^4}};$$

$$k_2 = r_0^4 - r_0^2 R_1 (R_0 + R_1) + R_0 R_1 (2b^2 + R_1^2).$$

Мощность сил среза на границе блоков 1 и 2:

$$N_5 = \pi \tau_s \frac{\nu_0}{3b} (R_1 - r_0)^2 (R_1 + 2r_0).$$

Мощность сил среза на границе блоков 2 и 3:

$$N_6 = \pi \tau_s \frac{\nu_0}{3b} (R_0 - r_0)^2 (R_0 + 2r_0).$$

Мощность внутренних сил в блоке 2, затрачиваемых на пластическую деформацию:

$$N_7 = \frac{\pi \tau_s \nu_0 \cdot k_3}{3R_0^2 \sqrt{3R_0^4 + r_0^4}},$$

где
$$k_3 = 3r_0^6 - 12r_0^5 R_0 - 9r_0^2 R_0^4 + r_0^4 (5R_0^2 + 5R_0 R_1 - R_1^2) + 3R_0^4 (R_0^2 + R_0 R_1 + R_1^2).$$

Выражение для определения усилия прессования, найденное методом верхней оценки имеет вид:

$$P = \frac{\pi \sigma_s}{\sqrt{3}} \left[\psi \left(b r_0 + 2L_{\text{ц}} R_1 + \frac{k_1 k_2}{b} \right) + \frac{k_3}{3R_0^2 \sqrt{3R_0^4 + r_0^4}} + \frac{k_4}{3b} \right], \quad (4)$$

где
$$k_4 = 4r_0^3 + R_0^3 + R_1^3 - 3r_0^2 (R_0 + R_1).$$

Вычисления по полученной формуле удобно реализовать в электронных таблицах, например MS Excel, тогда подстановкой необходимых параметров калибровки инструмента и свойств материала можно быстро определять численное значение усилия прессования.

На рис. 17 приведено сравнение усилий деформации, найденных с помощью метода конечных элементов и метода верхней оценки. Для расчета были приняты значения коэффициента трения 0,3; сопротивления деформации материала 50 МПа, что соответствует условиям задач, решаемых с помощью метода конечных элементов. Точность определения усилия деформации методом конечных элементов определяется величиной шага моделирования (решение задачи дискретно).

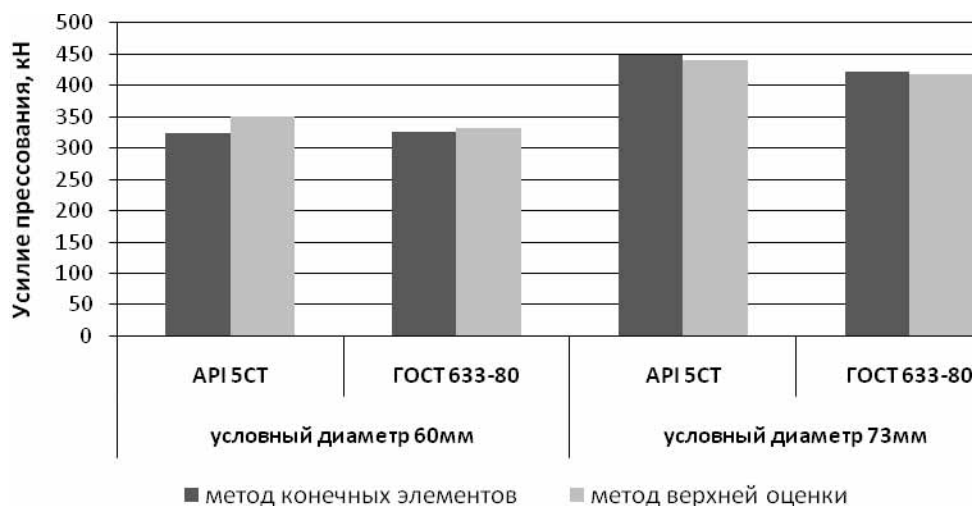


Рис. 17 – Сравнение методов определения усилия деформации

Из рис. 17 видно, что предложенная математическая модель для определения усилия прессования имеет достаточно высокую сходимость с результатами, полученными методом конечных элементов, а также удовлетворяет реальным условиям производства. Эта модель может быть использована при разработке новых технологий наружной высадки концов труб, например при освоении новых видов продукции.

5. Пути повышения технико-экономических показателей производства

Технико-экономические показатели производства и себестоимость продукции при обеспечении требуемого качества продукции имеют определяющее значение на рынке труб нефтяного сортамента. В работе рассмотрены некоторые пути повышения эффективности производства.

5.1. Повышение стойкости инструмента

Рабочие температуры инструмента при установившемся режиме работы пресса составляют для матриц 180-250°C, для пуансонов – 100-150°C. Инструмент работает в достаточно тяжелых условиях, усилие деформации составляет не менее 350 кН, а давление в главном цилиндре пресса – 10-15 МПа. На рабочей поверхности инструмента не допускаются трещины, наваренные частицы металла, грубая сетка разгара (рис. 18)

являющиеся основными причинами выхода его из строя. Ухудшение качества поверхности инструмента приводит к образованию на поверхности высаженных концов труб раковин; ужимов, складок, а также на внутренней поверхности труб следов от грубой сетки разгара.

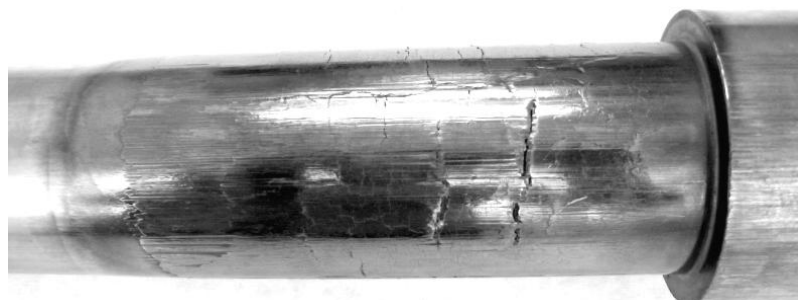


Рис. 18 – Грубая сетка разгара на рабочей поверхности пуансона, переходящая в трещину

Одним из направлений повышения износостойкости является упрочнение поверхности инструмента [9,10] способом азотирования. Под азотированием понимается процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стального изделия или детали азотом при нагреве в соответствующей среде. Изготовление инструмента и его термообработка для его последующих испытаний на прессе производились по существующим режимам: выдержка в течение 24 часов при температуре 560-580°C в среде ионов азота. Толщина азотированного слоя, определенная на образце-свидетеле из марки стали 40X, составила 0,50-0,75 мм. Изменение твердости инструмента после обработки представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний инструмента после азотирования

Инструмент		Твердость, HRC		Стойкость после азотирования		Причины выхода из строя
		исходная	после азотирования	шт. концов	тн	
Пуансон	API 73	40-43	56-59	20920	679	сетка разгара
	API 73	28-30	49-53	12642	579	сетка разгара
	API 73	38-43	56-60	23226	1034	сетка разгара
	API 73	39-42	55-58	9866	444	сетка разгара, выкашивание
	API 73	46-50	60-63	5672	250	трещина
Среднее значение		38-42	55-59	14465	597	
Комплект матриц	API 89	46-48	55-62	-	-	
	API 60	47-49	59-64	-	-	
	API 60	46-49	58-62	140	5	налипание металла
	ГОСТ 73	41-43	56-63	6238	285	налипание металла
	ГОСТ 73	36-38	57-61	-	-	
Среднее значение		43-45	57-62	3189	145	

Из таблицы видно, что изменение технологии изготовления инструмента за счет использования операции азотирования приводит к увеличению твердости поверхностного слоя пуансонов и матриц в среднем в 1,4 раза. При этом упрочнение пуансонов оказалось эффективным с точки зрения повышения стойкости, а основной причиной выхода их из строя по-прежнему было образование сетки разгара. Среднее значение стойкости

азотированных пуансонов составило 597 тн, что превышает стойкость серийного инструмента (170 тн) более чем в 3,5 раза (рис. 19), при этом удорожание изготовления пуансонов не превысило 18,5%.



Рис. 19 – Средняя стойкость пуансонов, тн

При работе на азотированных матрицах повысилась склонность к налипанию металла на инструмент, в результате чего два комплекта матриц вышли из строя. Наибольшая стойкость комплекта матриц для высадки концов труб размером 73x5,5 мм по ГОСТ 633-80 составила 285 тн, что ниже стойкости серийного инструмента (800 тн) более чем в 2,8 раза.

Таким образом, в результате испытаний азотированного инструмента подтверждена высокая эффективность модернизации технологии изготовления пуансонов для высадки концов труб, при этом увеличение стойкости составляет не менее 3,5 раз при удорожании производства на 18,5%. Установлено, что изменение технологии изготовления матриц путем введения операции азотирования является нецелесообразным.

5.2. Повышение качества смазочного материала

Анализ возможности повышения технико-экономических показателей производства за счет повышения качества смазочного материала проведено в условиях производства ОАО «ПНТЗ».

Технологическая смазка поставляется в виде концентрата, а приготовление смазки осуществляется непосредственно на участке высадки труб в отдельном баке, снабженном специальным обогревом и мешалкой. Для подачи смазки на пресс предусмотрен дополнительный расходный бак. Для приготовления коллоидно-графитовых смазок в первый бак подается расчетное количество концентрата смазки, а затем при постоянном перемешивании добавляется необходимое количество воды в зависимости от пропорции смешивания.

При выборе смазочного материала и режимов нанесения смазки на инструмент необходимо учитывать имеющиеся особенности нанесения смазки на поверхность инструмента. При подаче на инструмент реализуется струйный способ нанесения рабочего состава смазки за счет использования сжатого воздуха. Смазка подается

одновременно через несколько форсунок круглого или эллипсовидного сечения для придания движущейся массе полидисперсных капель, т.е. факелу, необходимой формы. Достигая поверхности инструмента, факел настигается на нее и распространяется по поверхности инструмента во все стороны. Часть капель, имея достаточную скорость и нужное направление, осаждается на поверхности инструмента и образует необходимый разделительный слой смазки. Другая часть капель, потеряв скорость, не достигает поверхности инструмента и образуется туман. К достоинствам струйного способа распыления смазки на инструмент можно отнести простоту устройства и обслуживания оборудования по нанесению смазки, как следствие высокую степень надежности работы пресса, возможность нанесения смазочных материалов с различными наполнителями, например, высокодисперсным графитом, а также обеспечение покрытия равной толщины по всей поверхности инструмента. Основным недостатком такого способа является большой расход смазочного материала за счет повышенного туманообразования. Более того при недостаточно высокой температуре инструмента, как правило, ниже 100°C, нанесенная смазка будет стекать с его поверхности, не создавая тем самым необходимого разделительного слоя. Для образования сухого, прочного графитового слоя инструмент должен быть разогрет до температуры 200-250°C, что также способствует достижению максимальной его износостойкости [11]. К другим недостаткам можно отнести загрязнение внутреннего пространства высадочного пресса, отложение графитовой смазки на различных частях оборудования, как следствие, необходимость частой замены направляющих и линейных подшипников механизма удержания и перемещения пуансонов.

По рекомендации фирмы SMS Meer применяется смазка Rhenus Thermosyn SGV, которая представляет собой водную эмульсию, содержащую мелкодисперсный графит, антифрикционные и диспергирующие присадки. Она предназначена для прессовых и кузнечно-прессовых операций высокой степени сложности при средних и высоких температурах до 1250°C. Технические показатели смазки Thermosyn SGV представлены в табл. 4. Для операций высадки концов труб в случае применения смазки Thermosyn SGV установлены пропорции смешивания от 1:6 до 1:10 (на 1 объем концентрата добавляется от 6 до 10 объемов воды).

Таблица 4

Технические показатели смазок Thermosyn SGV и Deltaforge F-578

Показатель	Thermosyn SGV	Deltaforge F-578
Внешний вид	Густая жидкость черного цвета	Жидкость средней вязкости
Запах	Легкий аммиачный	Отсутствует
Средняя плотность при 20°C, кг/м ³	1050	1102
Значение pH при 20°C	9,5-10,5	Около 11,5
Срок хранения	12 месяцев	24 месяца

В ходе наблюдений за работой оборудования при использовании смазки Thermosyn SGV было выявлено, что смазка наносится на инструмент с большими потерями. Определено, что наиболее эффективным является нанесение смазки на пуансон

непосредственно перед самым процессом высадки, когда часть смазки не успевает высохнуть. На матрицы смазка наносится в момент, когда полусферы, в которых закреплены матрицы, находятся в разведенном неподвижном состоянии. Температура пуансона в момент нанесения смазки составляет в среднем 100-120°C, матриц – 180-210°C. Стеkanie рабочего состава смазки приводит к дополнительным потерям смазочного материала, имеющего невысокую степень разбавления до 1:10. Степень полезного использования смазки, соответствующая уровню теоретического расхода, достаточного для формирования удовлетворительного покрытия, составляет 10% от подаваемого объема. Соответственно уровень безвозвратных потерь смазки составляет в среднем 90%. Расчет теоретического расхода производился исходя из расхода смазки 100 г/м². При указанном уровне полезного использования расход смазки составляет 4-4,5 кг/тн. Следует отметить, что стоимость смазки высокая и составляет 290-400 руб./кг.

Альтернативная смазка инструмента Deltaforge F-578 была предложена фирмой Henkel AG&Co KGaA, стоимость которой 227 руб./кг ниже стоимости смазки Thermosyn SGV. Deltaforge F-578 является бездымной графитной смазкой на основе водной графитной дисперсии, не содержащей в своем составе аммиака, не имеющей неприятного запаха, сохраняет свои смазывающие и разделительные свойства в сложных операцияхковки и штамповки при степени разбавления до 1:20 и выше. Технические показатели смазки Deltaforge F-578 представлены в табл. 4.

В промышленных опытах применяли различную степень разбавления: 1:5; 1:9; 1:12; 1:17; 1:35, а температура пуансона была повышена до 110-140°C. Во всех опытах смазка различной концентрации дала положительный результат по формоизменению конца трубы, достижению требуемой точности размеров. Варианты со степенью разбавления 1:5, 1:9, 1:12, 1:17 связаны с повышенным расходом смазки, неудовлетворительным высыханием на инструменте и со стеканием смазки с пуансона. Кроме того, при указанных пропорциях разбавления возникли проблемы надежности работы системы подачи смазки, связанные с неудовлетворительной работой фильтров и распределительных клапанов системы. Поэтому в дальнейшем было рекомендовано соотношение концентрата смазки и воды 1:30, а также разработка и внедрение технологии промывки баков и системы подачи смазки. В настоящее время расход смазки составляет 1,84 кг/тн.

Модернизация технологии высадки концов труб на прессе фирмы SMS Meer, связанная с выбором эффективной смазки и повышением качества ее нанесения на инструмент позволили ОАО «ПНТЗ» более чем в 2,5 раза снизить затраты на производство высококачественных насосно-компрессорных труб с высаженными концами.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы повышения эффективности производства насосно-компрессорных труб с высаженными концами на гидравлических прессах SMS Meer, а также вопросы обеспечения высокого уровня качества готовой продукции.

Для этого рассмотрена технология высадки концов труб и определено влияние технологических факторов на качество изделий. Анализ особенностей формоизменения металла в очаге деформации позволил выявить наиболее вероятные места образования дефектов и определить способы их предотвращения. Установлено, что для устранения внутренних незаполнений калибра необходимо увеличивать длину нагрева конца трубы.

В результате анализа температурных условий процесса было рекомендовано изменение настроек пирометров второго индуктора в сторону увеличения коэффициента излучения до 0,93 с целью отображения действительной температуры нагрева, а также найдена зависимость для определения длины нагрева с учетом потерь тепла за счет теплопроводности.

В работе предложена методика расчета энергосиловых параметров процесса, а также найдена зависимость для определения усилий деформации для наружной высадки концов труб. Показано, что предложенная математическая модель имеет достаточную точность при расчете усилий прессования и может быть использована при разработке технологий высадки новых типоразмеров труб.

В работе найдены эффективные меры повышения стойкости инструмента и качества поверхности труб, а также даны рекомендации по повышению технико-экономических показателей производства насосно-компрессорных труб с высаженными концами за счет повышения качества технологической смазки.

Результаты представленной работы, имеющие научную новизну и практическую значимость, использованы на производстве в условиях ОАО «ПНТЗ» и позволили обеспечить выход годной продукции на уровне 99,8%.

Список использованных источников

1. Ткаченко А.В. и др. Трубы для нефтяной промышленности. М. : Металлургия, 1986. – 256 с.
2. Дронов А.И., Ерпалов М.В., Богатов А.А. и др. Проблемы и достижения в производстве насосно-компрессорных труб с высаженными концами на ОАО «ПНТЗ» // Труды IX Конгресса прокатчиков (том 1), г. Череповец, 2013. – С. 170-176.
3. Остренко В.Я. Технологические особенности высадки труб в закрытых матрицах // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1965. – №1. – С. 33-35.
4. Шевченко А.А. Исследование некоторых вопросов процесса высадки труб // Производство труб: сборник статей по теории и практике трубного производства. М. : Металлургия, 1971. – Вып. 25. – С. 171-175.
5. Остренко В.Я. Исследование процесса высадки труб методом фотоупругости // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1967. – №3. – С. 32-34.
6. Баричко Б.В. Исследование процесса высадки концов бурильных труб // Труды VIII Конгресса прокатчиков, г.Магнитогорск, 2010. – Т.1. – С. 284-290.
7. Остренко В.Я. Аналитический метод определения силовых и энергетических параметров высадки концов труб // Производство труб: сборник трудов ВНТИТИ. М. : Металлургия, 1968. – Вып. 20. – С. 223-230.
8. Стрижак В.И. Определение силовых параметров при высадке концов труб на горизонтально-ковочной машине мощностью 12500 кН (1250 Т) // Производство труб: сборник трудов ВНТИТИ. М. : Металлургия, 1969. – Вып. 22. – С. 223-230.
9. Афонин В.К., Ермаков Б.С., Лебедев Е.Л. и др. Металлы и сплавы. Справочник. Издательство НПО «Профессионал», 2003. – 1092 с.
10. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М. : Машиностроение, 1982. – 212 с.
11. Петров А.Н., Петров П.А., Петров М.А. Комплексное исследование коллоидно-графитовых смазочных материалов на водной основе // Сборник трудов конференции 145-летие МГТУ «МАМИ», 2010. – С. 98-106.